干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

乌鲁木齐典型暴雪天气机理及成因分析

魏娟娟[1,2]， 李 娜[1]， 万 瑜[1]， 芒苏尔·艾热提[1]， 施俊杰[1]
（1. 新疆维吾尔自治区气象台，新疆 乌鲁木齐 830002；
2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：利用常规地面、高空观测资料、NCEP/NCAR 1°×1°再分析和FY卫星资料，针对乌鲁木齐1990年以来的3场典型暴雪天气，从高低空环流和天气系统配置、不稳定条件、水汽、动力及黑体亮温（TBB）变化等方面综合对比分析暴雪成因。结果表明：（1）3场暴雪均发生在欧洲高压脊东南衰退，推动西西伯利亚低槽东移南下，与中纬度短波槽结合的环流形势下，高低空系统呈"后倾槽"结构，乌鲁木齐处在925~600 hPa西北急流与600~200 hPa强西南急流叠置区，且天山山脉的地形强迫抬升有利于暴雪的维持和加强。（2）暴雪前850~700 hPa均有东南风存在，微差平流作用有利于平流逆温生成和加强，使得能量不断积聚，后期冷空气进入，冷锋锋生，层结不稳定发展，为暴雪天气提供热力条件，东南风和平流逆温维持时间越长，储存能量越多，降雪越强。（3）暴雪区存在西南和偏西2条水汽输送通道，中层水汽输送对乌鲁木齐暴雪至关重要，850~600 hPa存在较强的水汽辐合，且700 hPa最强。水汽输送、辐合强度及持续时间共同决定暴雪强度。（4）TBB与降雪强弱有一定的对应关系，TBB越低，云顶高度越高，中尺度云团发展越旺盛，降雪越强，降雪前TBB（云顶高度）的第一次迅速降低（升高）预示降雪开始，降雪过程中TBB降低对应降雪强度增强，且TBB降幅越大、低TBB值维持时间越长，降雪越强。

关 键 词：典型暴雪；天气系统配置；天气机理；成因分析；乌鲁木齐
文章编号：

暴雪是我国北方冬季主要灾害天气之一，对交通出行、畜牧业、设施农业、城市运行等均有严重影响。新疆暴雪频发区位于伊犁河谷、塔城、阿勒泰及天山北坡沿线一带，乌鲁木齐位于天山北坡沿线经济带上，是暴雪易发和频发区，也是雪灾特重灾区[1]，暴雪给社会经济和人民生活造成较大影响，成为制约经济建设和可持续发展的重要因素之一。乌鲁木齐地处天山北麓中段、准噶尔盆地南缘，三面环山，地势东南高西北低，属于温带半干旱大陆性气候，是新疆首府和政治、经济、文化中心，是我国西部对外开放的重要门户，也是"丝绸之路"的重要枢纽，在气候暖湿化背景下，暴雪等气象灾害频繁，当地政府和民众对气象防灾减灾的要求越来越高。

对于暴雪的形成机理，国内学者已进行了大量的研究，东北暴雪的研究表明，低涡是引发暴雪的直接原因，低空偏东或东南急流是水汽输送带，也是低层锋区和低值系统加强的必要条件[2-4]。华北暴雪的研究表明，暴雪位于200 hPa极锋急流入口区右后方和副热带急流出口区左前方、700 hPa西南急流左前方、925~850 hPa偏东急流右前方，西南急流提供充足的水汽，建立和维持对流不稳定层结，并与偏北急流形成辐合，产生抬升作用[5-7]。西北暴雪的研究表明，500 hPa冷槽、700 hPa低涡切变、850 hPa东路回流冷空气共同作用是暴雪天气的大尺度环流背景，低层强的风向、风速辐合，西南急流为降雪提供动力和水汽条件，急流加强是降雪增幅的主要原因[8-9]。而北疆暴雪的影响系统有中亚长波槽、中亚低涡、乌拉尔山长波槽和西西伯利亚低

收稿日期：2021-11-19； **修订日期**：2022-04-17
基金项目：国家自然科学基金重点项目（42030612）；第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0102）资助
作者简介：魏娟娟（1994-），女，助理工程师，主要从事天气预报和灾害性天气研究. E-mail: 1480284062@qq.com
通讯作者：李娜（1986-），女，硕士，高级工程师，主要从事天气预报和灾害性天气研究. E-mail: lina9861201@163.com

涡(槽)[10],新疆气象学者[11-14]通过时空分布、环流背景和中尺度特征等对北疆偏北地区暴雪进行分析,揭示了暴雪天气的产生机理。乌鲁木齐暴雪的研究发现,暴雪时高低空系统呈后倾结构,降雪前存在位势不稳定加强,中尺度云团是最直接的影响系统,具有明显的中β尺度特征,且回波强度和中低层风场辐合越强,回波顶高越高,黑体亮温(TBB)等值线梯度越大,降雪强度越大[15-18];天山附近锋面呈带状准垂直分布,动力锋生激发的次级环流使垂直运动维持发展,风辐合强度与降雪强度正相关[19]。目前,对乌鲁木齐暴雪的研究多针对单次暴雪过程进行诊断分析,本文选取近年来乌鲁木齐冬季最强的3场暴雪天气进行综合对比分析,以期揭示典型暴雪发生发展时大尺度环流背景、高低空配置等方面的共性,以及不稳定条件、动力、水汽和中尺度演变特征等方面存在的强度差异,从而揭示暴雪的形成机理,提高预报预警能力。

1 资料与方法

利用常规地面、高空观测资料、NCEP/NCAR 1°×1°再分析、FY2卫星资料,选取乌鲁木齐冬季1990年以来最强的3场暴雪,分别发生在2015年12月11日(简称"12·11"过程)、2021年1月23日(简称"01·23"过程)和2014年12月8日(简称"12·08"过程),采用天气动力学分析方法,对暴雪的大尺度环流背景及不稳定、动力、水汽等进行诊断分析,揭示典型暴雪的天气机理及强度差异成因。

2 天气概况

3场暴雪是1990年以来乌鲁木齐日降雪量突破历史极值的高影响天气,具有累计雪量大、降雪强度强、新增积雪厚等特点,对城市交通、设施农业等产生较大影响。

"12·11"过程突破冬季历史最大降雪日极值,降雪持续时间最长33 h(10日17:00—12日08:00),累计降雪量46.3 mm,最大日降雪量35.9 mm(10日20:00—11日20:00),最大小时雪强2.8 mm,新增积雪45 cm;"01·23"过程突破1月历史日降雪量极值,居冬季日降雪量第2位,持续18 h(23日04:00—22:00),累计降雪量18.9 mm,最大日降雪量17.8 mm(22日20:00—23日20:00),最大小时雪强2.1 mm,新增积雪19 cm;"12·08"过程日降雪量居历史冬季日降雪量第3位,持续15 h(8日01:00—16:00),累计降雪量17.7 mm,最大小时雪强1.9 mm,新增积雪16 cm。对比3场暴雪的累计降雪量、最大日降雪量、最大小时雪强、持续时间及新增积雪厚度,"12·11"过程最强,"01·23"过程次之,"12·08"过程最弱(表1)。

3 高低空环流配置

3.1 环流形势

500 hPa上,"12·11"过程前,8日欧洲高压脊向北发展,原位于乌拉尔山的低涡东移发展至西西伯利亚;9—11日,欧洲脊上游不断有短波槽东移,脊后冷平流和正热成风涡度平流使高压脊向东南衰退,推动西西伯利亚低槽东移南下,与里海南部的中纬度短波系统结合,南伸至30°N以南,低槽曲率加大,槽前正涡度平流加强,上升运动发展,槽前西南偏南气流(18 m·s^{-1})将中纬度的水汽向暴雪区输送(图1a)。"01·23"过程前,21日欧洲脊发展,乌拉尔山低涡维持,里咸海南部低槽东移;22日受不稳定小槽侵袭欧洲高压脊向东南衰退,乌拉尔山低涡减弱成槽东移至西西伯利亚,南压至40°N附近,中纬度低槽南伸至30°N,移速较西西伯利亚低槽快,南北2支系统呈"阶梯槽",槽前西南急流向北不断输送暖湿气流;23日西西伯利亚低槽继续东移,乌鲁木齐处于槽前南风气流(18 m·s^{-1})控制下(图1b)。"12·08"过程前,5日欧洲高压脊发展;6—7日

表1 乌鲁木齐历史最强3场暴雪天气降雪实况对比

Tab. 1 Comparison of snowfall in three strongest snowstorms in history in Urumqi

暴雪过程	过程累计雪量/mm	最大日降雪量/mm	新增积雪厚度/cm	最大小时雪强/mm	持续时间/h	强度
"12·11"过程	46.3	35.9	45	2.8	33	1
"01·23"过程	18.9	17.8	19	2.1	18	2
"12·08"过程	17.7	17.7	16	1.9	15	3

注:"12·11"过程、"01·23"过程、"12·08"过程分别表示发生在2015年12月11日、2021年1月23日和2014年12月8日的暴雪。

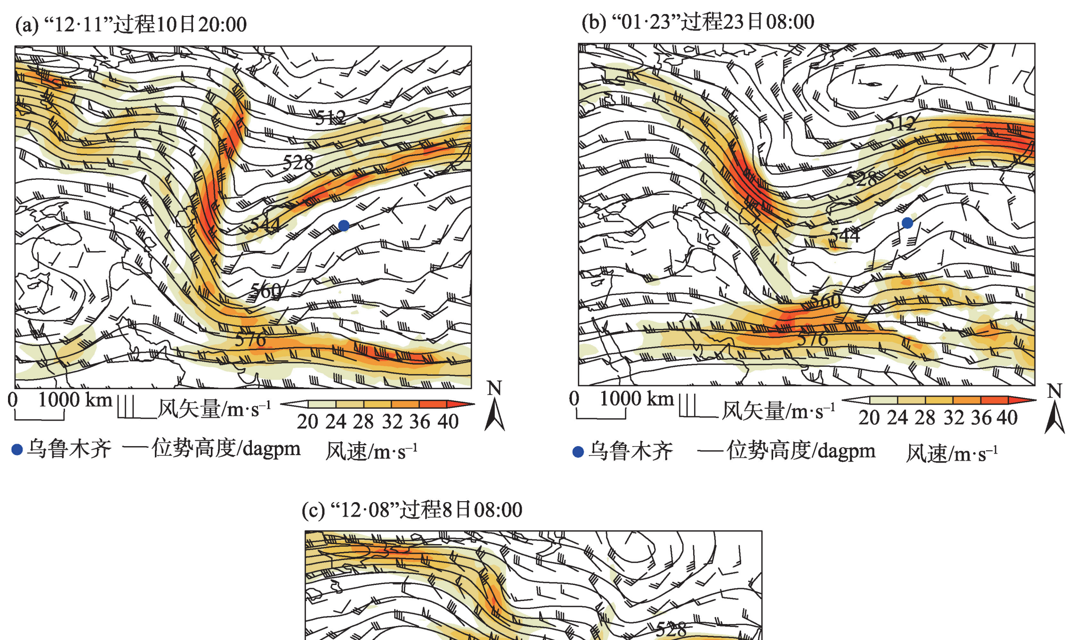


图1　500 hPa位势高度场

Fig. 1　500 hPa geopotential height field

高压脊衰退、乌拉尔山低涡减弱成槽移至西西伯利亚，中纬度里咸海南部小槽快速东移，与西西伯利亚低槽合并，南压至35°N附近，槽前西南急流不断输送暖湿气流；8日低槽快速东移，乌鲁木齐处于槽前西南气流（18 m·s^{-1}）控制下（图1c）。3场暴雪500 hPa均呈"两脊一槽"经向环流，欧洲为高压脊，西西伯利亚为低槽，随欧洲高压脊衰退，推动低槽东移南下与中纬度短波槽结合，锋区加强，槽前正涡度平流加强，上升运动发展，且槽前西南气流加强，有利于将中纬度水汽向暴雪区输送。

地面气压场上，3场暴雪均有明显的地面冷高压以偏西路径入侵北疆，高压中心强度分别为1047.5 hPa、1045.0 hPa、1060.0 hPa，高压强度越强，系统移速越快，"12·08"过程移速快，降雪维持时间短，累计降雪量较前2个过程小。

3.2　高低空急流

"12·11"过程自10日08:00高空槽前西南气流影响乌鲁木齐，600~200 hPa为西南风，500 hPa最大偏南风24 m·s^{-1}，600 hPa以下为偏北风，最大风速16 m·s^{-1}（图2a）；"01·23"过程自23日02:00高空槽前西南气流影响乌鲁木齐，600~200 hPa为西南风，500 hPa最大偏南风20 m·s^{-1}，600 hPa以下为西北风，最大风速16 m·s^{-1}（图2b）；"12·08"过程自8日02:00高空槽前西南气流影响乌鲁木齐，600~200 hPa为西南风，600 hPa以下为西北风，最大风速12 m·s^{-1}（图2c）。分析3场暴雪期间高低空急流的空间分布（图略），300 hPa高空急流轴均位于北疆偏西至蒙古地区，急流核风速分别为62 m·s^{-1}、60 m·s^{-1}、55 m·s^{-1}，850 hPa配合有西北急流，乌鲁木齐位于高空西南急流入口区右侧，低空西北急流前方。

综上，925~600 hPa西北急流和600~200 hPa西南急流的共同作用造成乌鲁木齐典型暴雪天气。300 hPa高空西南急流入口区右侧的强辐散和抽吸作用、500 hPa槽前正涡度平流均有利于上升运动的

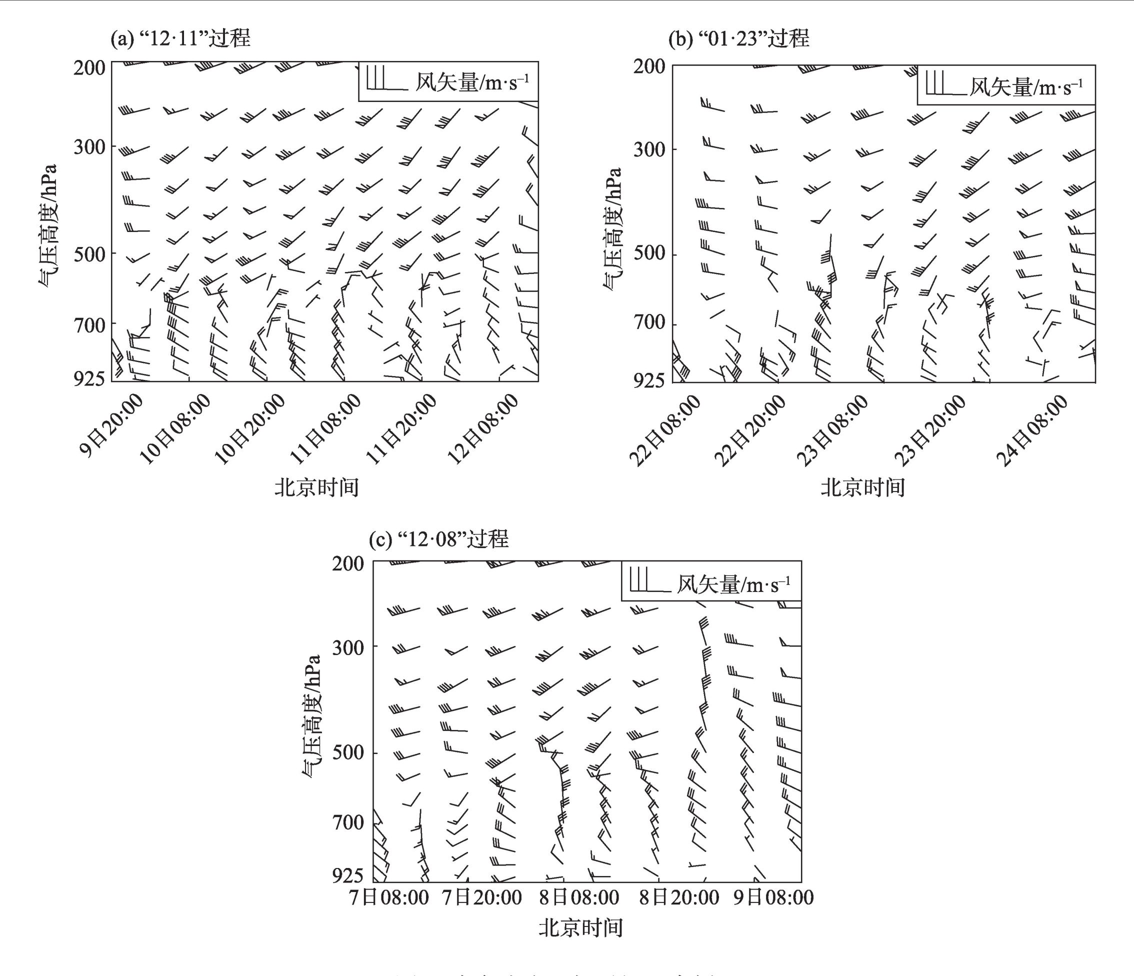


图2 乌鲁木齐风场时间垂直剖面

Fig. 2 Time vertical profile of wind field in Urumqi

发展和维持；槽前西南急流向北输送水汽，在暴雪区形成高湿区，建立和维持暴雪区上空的不稳定层结；低层西北急流携带冷空气进入，形成冷垫，有利于暖湿气流爬升；急流前方存在强风速辐合，且西北急流与准东西向的天山山脉近乎垂直，天山北坡出现风向、风速辐合和地形强迫抬升，加剧上升运动的发展和维持。故暴雪位于925~600 hPa西北急流和600~200 hPa强西南急流的叠置区，配合有利的热力和水汽条件，造成乌鲁木齐的典型暴雪天气。

4 暴雪强度差异成因分析

4.1 热力条件

4.1.1 东南风、温度平流和假相当位温（θ_{se}） 筛选2011—2021年乌鲁木齐38场中雪及以上量级降雪前850 hPa风场特征，中雪、大雪、暴雪前出现东南风的概率分别为24%、50%、100%（表2），故在有利的环流背景下，前期850 hPa东南风对暴雪预报有一定的指示意义，那么东南风的强度、维持时间和降雪具体有怎样的对应关系呢?“12·11”过程前850 hPa附近东南风维持约54 h，7日14:00—8日20:00，700 hPa至地面均为东南风，暖平流作用使得地面至700 hPa出现升温，地面温度升高至2.1 ℃；8日20:00—9日20:00，850~700 hPa东南风增强（16 m·s⁻¹），暖平流使得850 hPa附近温度继续升高至4 ℃，

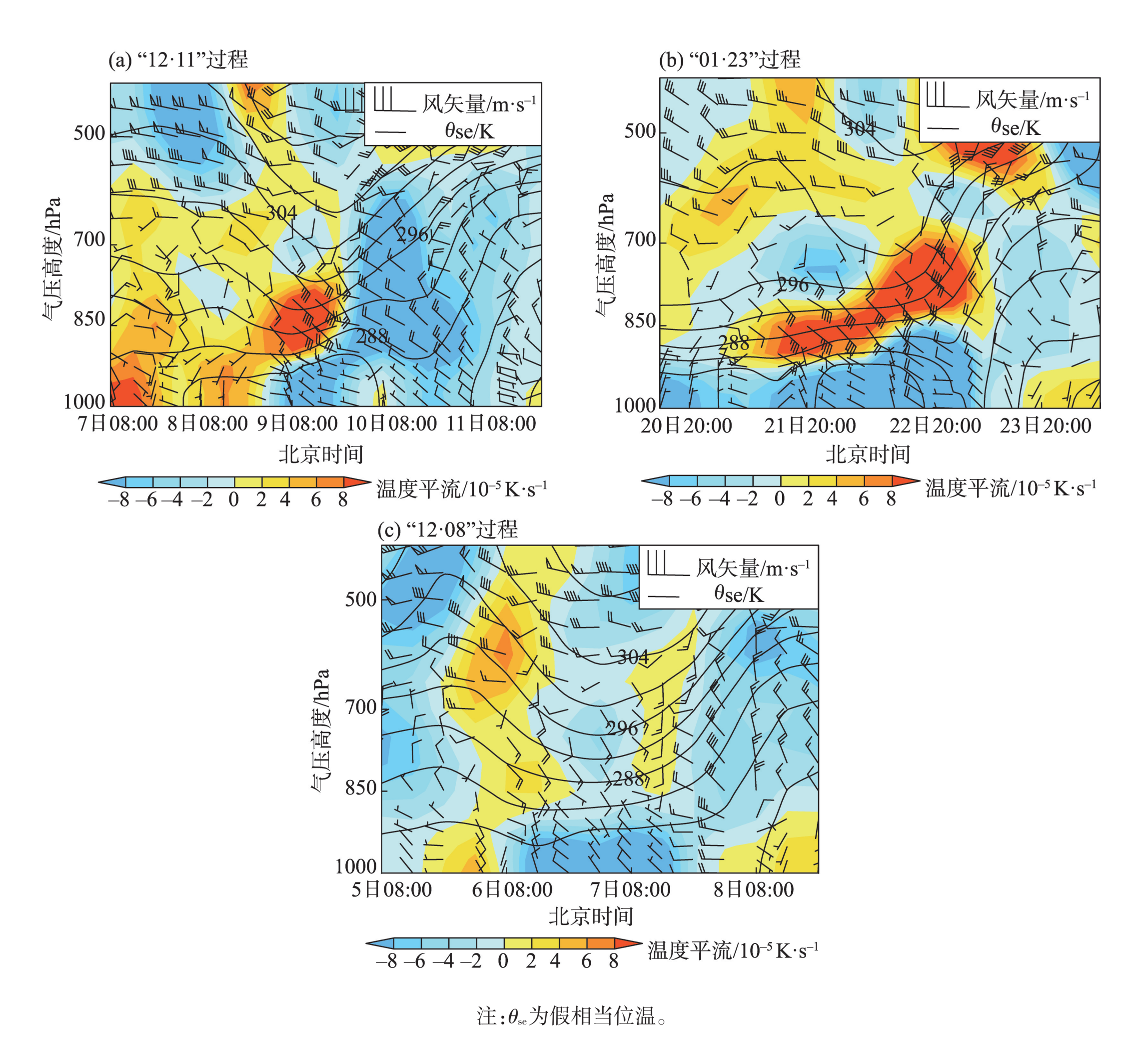
表2 2011—2021年乌鲁木齐不同量级降雪前850 hPa风向出现频次

Tab. 2 Occurrence frequency of wind direction at 850 hPa before snowfall of different magnitudes in Urumqi from 2011 to 2021

850 hPa风向		降雪量级		
		中雪	大雪	暴雪
西北	频次/次	16	5	0
	概率/%	76	50	0
东南	频次/次	5	5	7
	概率/%	24	50	100

而近地面以偏北风为主，冷平流使得温度略有下降，微差平流作用使得降雪前平流逆温生成和维持，降雪前θ_{se}呈下凹趋势；10日08:00后，低层东南风转为西北风，冷空气接地形成冷垫，冷平流达-8×10^{-5} K·s^{-1}，θ_{se}出现上凸高能舌，等θ_{se}梯度明显增大，冷锋锋生（图3a）。"01·23"过程前850~700 hPa东南风维持36 h，850 hPa附近最强（16 m·s^{-1}），暖平流使得850 hPa附近温度升高至0 ℃，而近地面以偏北风为主，微差平流致使平流逆温生成和加强，降雪前θ_{se}较平直；23日08:00后，低层东南风转为西北风，冷平流达-4×10^{-5} K·s^{-1}，θ_{se}出现上凸高能舌，600 hPa以下等θ_{se}线与地面垂直，梯度明显增大，冷锋锋生（图3b）。"12·08"过程前850~700 hPa东南风维持30 h，最大风速8 m·s^{-1}，东南风和暖平流偏弱，850 hPa附近温度约-4 ℃，近地面以偏北风为主，平流逆温较前2场天气弱，降雪前θ_{se}呈下凹趋势；7日20:00后，低层东南风转为西北风，冷平流达-4×10^{-5} K·s^{-1}，θ_{se}出现上凸高能舌，等θ_{se}梯度明显增大，冷锋锋生（图3c）。综上，暴雪前850~700 hPa均有东南风存在，微差平流使得降雪前平流逆温生成和维持，能量不断积聚，后期冷锋锋生，暖湿气流沿冷垫被迫抬升，增强冷暖空气的交汇，促进不稳定增长，有利于暴雪的产生和持续。对比3场暴雪，东南风维持时间、强度、前后期冷暖平流呈现"12·11"过程>"01·23"过程>"12·08"过程的特征，与降雪强度对应一致，东南风的长时间维持使平流逆温维持时间越长，储存的能量越多，降雪越强。故降雪前850~700 hPa东南风是乌鲁木齐暴雪预报的一个重要特征，且东南风的强度和维持时间对降雪强弱有一定的指示意义。

4.1.2 ***逆温层破坏前后温湿廓线*** 逆温层是指温度随高度升高而增加的现象，将阻碍空气的对流上升运动，储存不稳定能量，有利于能量堆积，当冷空气侵入，逆温破坏，不稳定能量释放，天气就会发生。



注：θ_{se}为假相当位温。

图3 乌鲁木齐风场、θ_{se}、温度平流时间垂直剖面

Fig. 3 Time vertical profiles of wind field, potential pseudo-equivalent temperature (θ_{se}), and temperature advection in Urumqi

分析3场暴雪前乌鲁木齐温湿廓线,“12·11”过程前9日20:00逆温层位于867~755 hPa,温度随高度增加13 ℃,907~850 hPa之间温度露点差≤2 ℃,为饱和层,850 hPa以上温度露点差逐渐增大,700 hPa达19 ℃(图4a)。“01·23”过程前22日20:00逆温层位于885~808 hPa,温度随高度增加11.7 ℃,885~860 hPa之间温度露点差≤4 ℃,为湿层,700 hPa温度露点差为27.8 ℃(图4b)。“12·08”过程前7日08:00低层存在2个逆温层,分别位于911~875 hPa和801~769 hPa,温度随高度分别增加5 ℃和11 ℃,911~850 hPa之间温度露点差<4 ℃,为湿层,700 hPa温度露点差为20 ℃(图4c)。随冷空气进入,3场暴雪前的逆温层均破坏,925~500 hPa均为湿层(图略)。综上,3场暴雪前低层均存在逆温层,850 hPa以上温度露点差大,形成“干暖盖”,储存不稳定能量,逆温层的厚度及温度随高度的增加量均为“12·11”过程>“01·23”过程>“12·08”过程,且“12·11”过程前近地面为饱和层,水汽与热力条件配合较好,降雪强度强。故在有利的水汽、动力条件下,降雪前逆温层的厚度及温度随高度的增加量对降雪强度的预报有一定的指示意义。

4.1.3 降雪前后抬升凝结高度(LCL)的变化 LCL是未饱和湿空气干绝热上升刚开始凝结的高度,主要取决于近地层的湿度大小,近似代表云底高度。“12·11”过程前LCL呈升高趋势,10日08:00自884.4 hPa开始迅速降低,11日20:00降至最低926 hPa(图5a);“01·23”过程前LCL较高,21日08:00自791 hPa开始降低,23日08:00降至最低899.4 hPa(图5b);“12·08”过程前7日20:00 LCL为884.9 hPa,8日08:00降至910.7 hPa(图5c)。综上,3场暴雪降雪时LCL均降至最低,说明降雪时近地层湿度加大,云底高度降低,当配合有利的垂直运动时,有利于云层厚度增加,云滴增长,即有利于降雪的产生和维持,其中“12·11”过程LCL最低,与近地层为饱和层相一致。

4.2 动力条件

分析3场暴雪乌鲁木齐散度、涡度及垂直速度时间剖面,“12·11”过程925~700 hPa负散度,中心

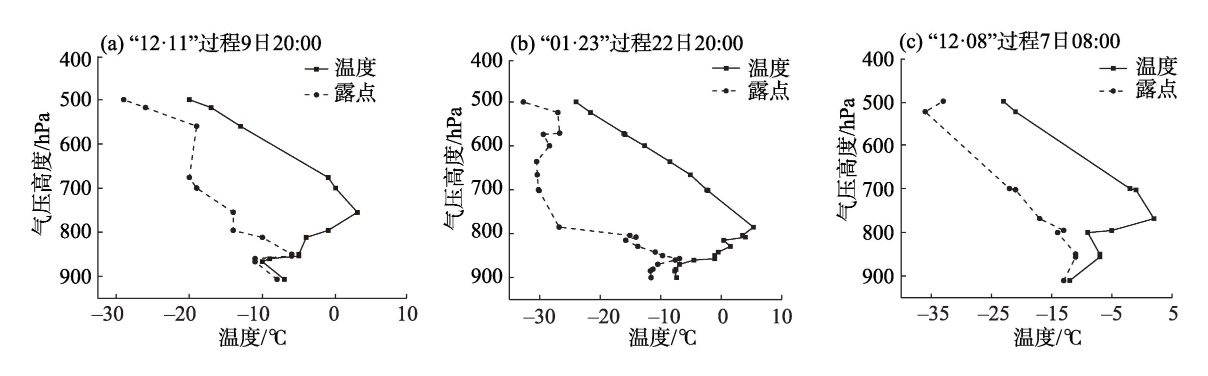
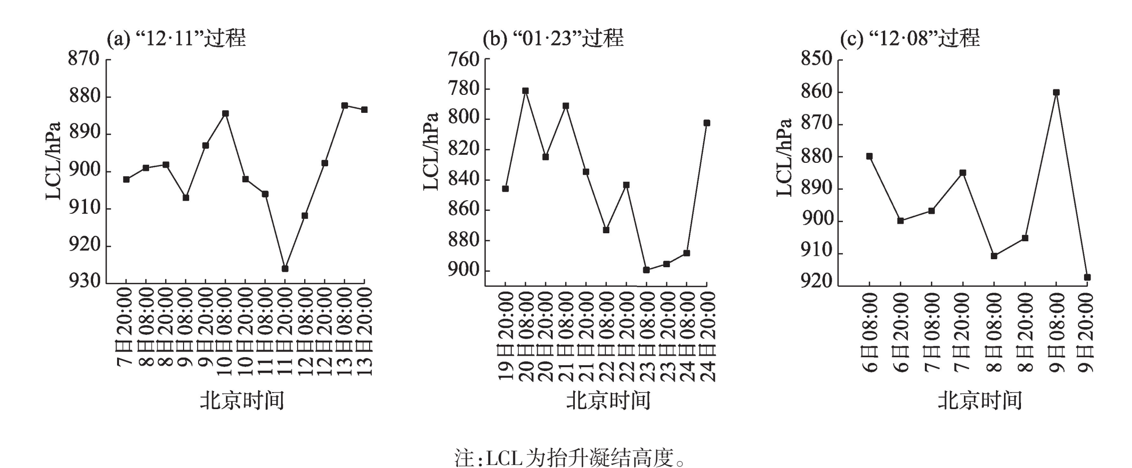


图4 暴雪前乌鲁木齐温湿廓线

Fig. 4 Temperature and humidity profiles before snowstorms in Urumqi



注:LCL为抬升凝结高度。

图5 暴雪前后乌鲁木齐LCL

Fig. 5 Lifting condensation level (LCL) before and after snowstorms in Urumqi

值−0.5×10⁻⁴·s⁻¹(850 hPa附近),700~500 hPa正散度,中心值0.2×10⁻⁴·s⁻¹,且700~500 hPa正涡度,中心值0.9×10⁻⁴·s⁻¹,对应925~300 hPa的上升运动,维持约48 h,700 hPa附近出现最大垂直速度−1.6 Pa·s⁻¹(图6a~b)。"01·23"过程925~600 hPa负散度,中心值−0.5×10⁻⁴·s⁻¹(700 hPa附近),600~300 hPa辐散,中心值0.3×10⁻⁴·s⁻¹,且700~500 hPa正涡度,中心值0.6×10⁻⁴·s⁻¹,对应925~400 hPa的上升运动,维持约36 h,700 hPa附近出现最大垂直速度−2.0 Pa·s⁻¹(图6c~d)。"12·08"过程850~500 hPa负散度,中心值−0.3×10⁻⁴·s⁻¹(700 hPa附近),500~300 hPa辐散,中心值0.25×10⁻⁴·s⁻¹,且700~400 hPa正涡度,中心值0.9×10⁻⁴·s⁻¹,对应925~300 hPa的上升运动,维持约24 h,850 hPa附近出现最大垂直速度−0.9 Pa·s⁻¹(图6e~f)。综上,3场暴雪均存在低层辐合、高层辐散的配置,且700~500 hPa正涡度随高空槽东移,槽前正涡度平流促进上升运动的发展与维持,为暴雪天气提供动力条件。对比3场暴雪的垂直速度,"12·08"过程最小,上升运动的维持时间最短,降雪强度最弱,"01·23"过程的上升运动强于"12·11"过程,但其上升运动的伸展高度和持续时间均低于"12·11"过程,降雪的强度受系统性垂直运动的影响外,还受热力、水汽及中小尺度系统引起的垂直运动等的影响。

4.3 水汽条件

水汽是降雪产生的必要条件,水汽输送、辐合强度及持续时间与暴雪强度有较好的正相关[20-21]。"12·11"过程500 hPa附近水汽通量1.8 g·s⁻¹·hPa⁻¹·cm⁻¹,850 hPa附近水汽输送较中层弱,为1.0 g·s⁻¹·hPa⁻¹·cm⁻¹;850 ~ 400 hPa水汽辐合,中心值−6×10⁻⁶ g·hPa⁻¹·cm⁻²·s⁻¹(700 hPa附近),持续约48 h(图7a)。"01·23"过程500 hPa附近水汽通量1.2 g·s⁻¹·hPa⁻¹·cm⁻¹,850 hPa附近水汽通量1.0 g·s⁻¹·hPa⁻¹·cm⁻¹;925~600 hPa水汽辐合,中心值−7×10⁻⁶ g·hPa⁻¹·cm⁻²·s⁻¹(700 hPa附近),持续约36 h(图7b)。"12·08"过程低层水汽通量1.8 g·s⁻¹·hPa⁻¹·cm⁻¹,400 hPa水汽通量为1.0 g·s⁻¹·hPa⁻¹·cm⁻¹;500 hPa附近水汽通量较小,约0.6 g·s⁻¹·hPa⁻¹·cm⁻¹,中层水汽输送较前2场天气弱;850~400 hPa水汽辐合,中心值−3×10⁻⁶ g·hPa⁻¹·cm⁻²·s⁻¹(700 hPa附近),持续约36 h(图7c)。

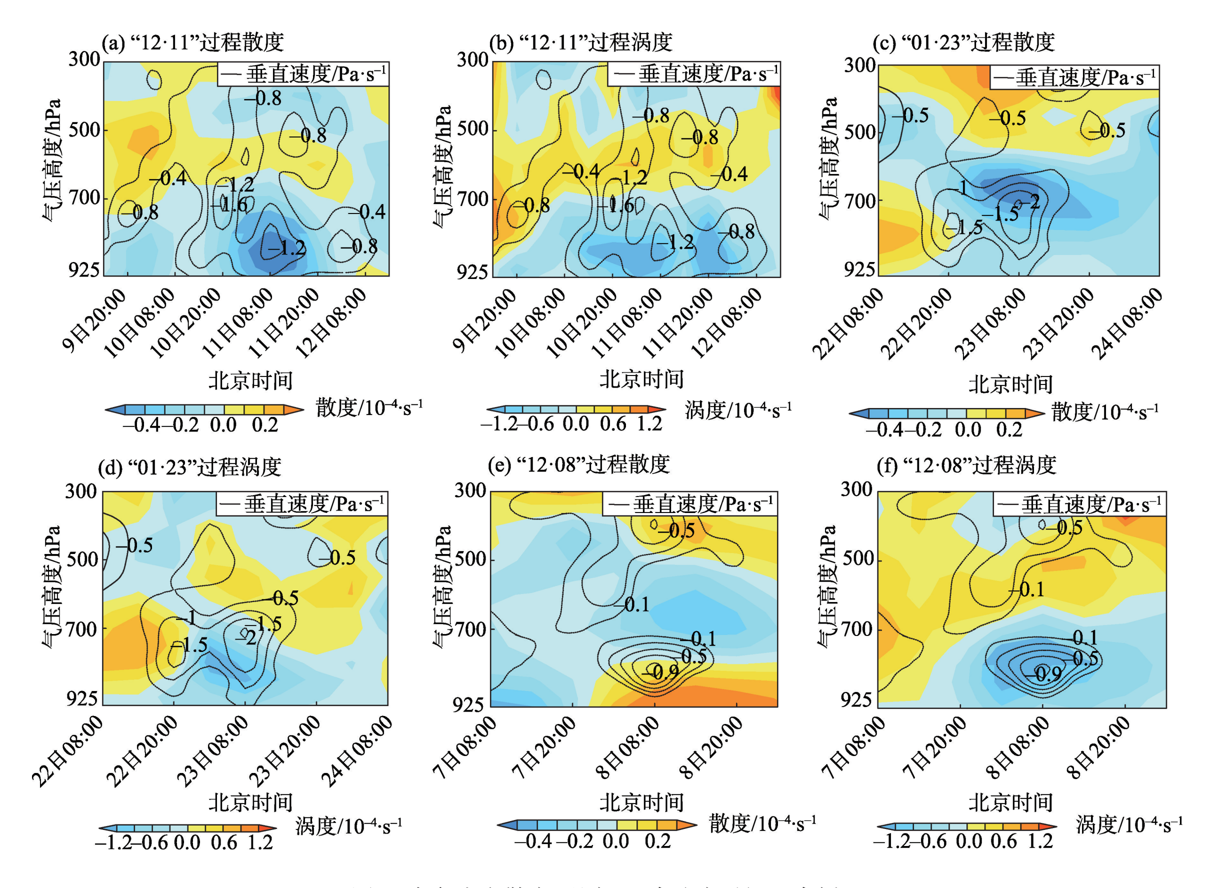


图6　乌鲁木齐散度、涡度、垂直速度时间垂直剖面

Fig. 6　Time vertical profiles of divergence, vorticity, and vertical velocity in Urumqi

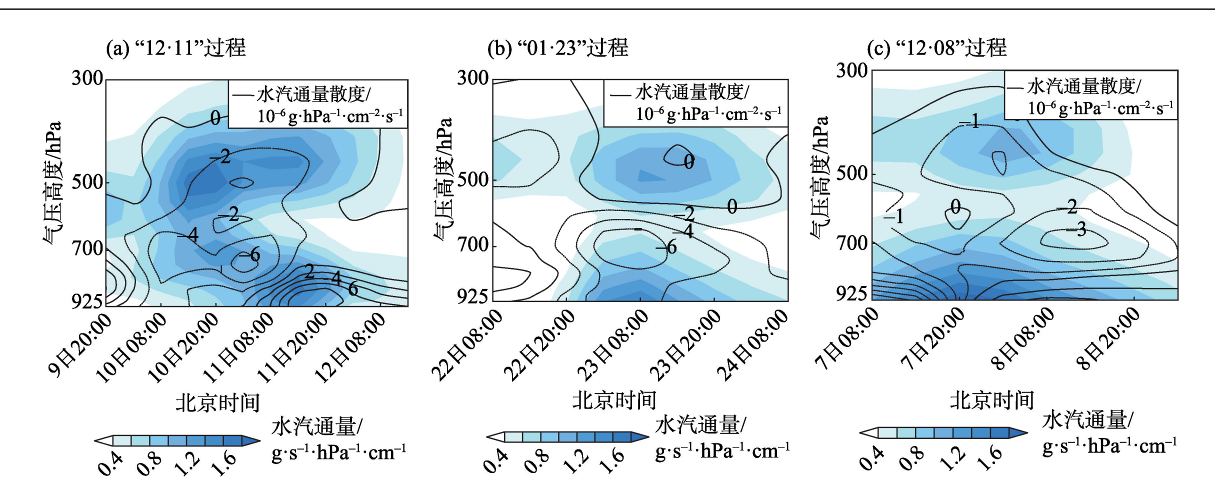


图7　乌鲁木齐水汽通量及水汽通量散度时间垂直剖面

Fig. 7　Time vertical profiles of water vapor flux and water vapor flux divergence in Urumqi

综上，3场暴雪925~300 hPa均有正的水汽通量，水汽输送明显且深厚，850~500 hPa水汽辐合，700 hPa附近最强。对比3场暴雪500 hPa附近水汽通量“12·11”过程>“01·23”过程>“12·08”过程，与降雪强度一致，说明中层水汽输送对乌鲁木齐暴雪至关重要。分析500 hPa水汽通量发现，水汽源地均位于红海、地中海至波斯湾一带及阿拉伯海，存在西南和偏西2条水汽输送路径，偏西路径水汽自红海到波斯湾附近海域沿西南气流向东北方向输送至里咸海以北，再沿偏西气流经巴尔喀什湖进入新疆输送至乌鲁木齐；西南路径水汽自波斯湾东部阿拉伯海一带沿西南气流向东北方向输送进入新疆（图略）。

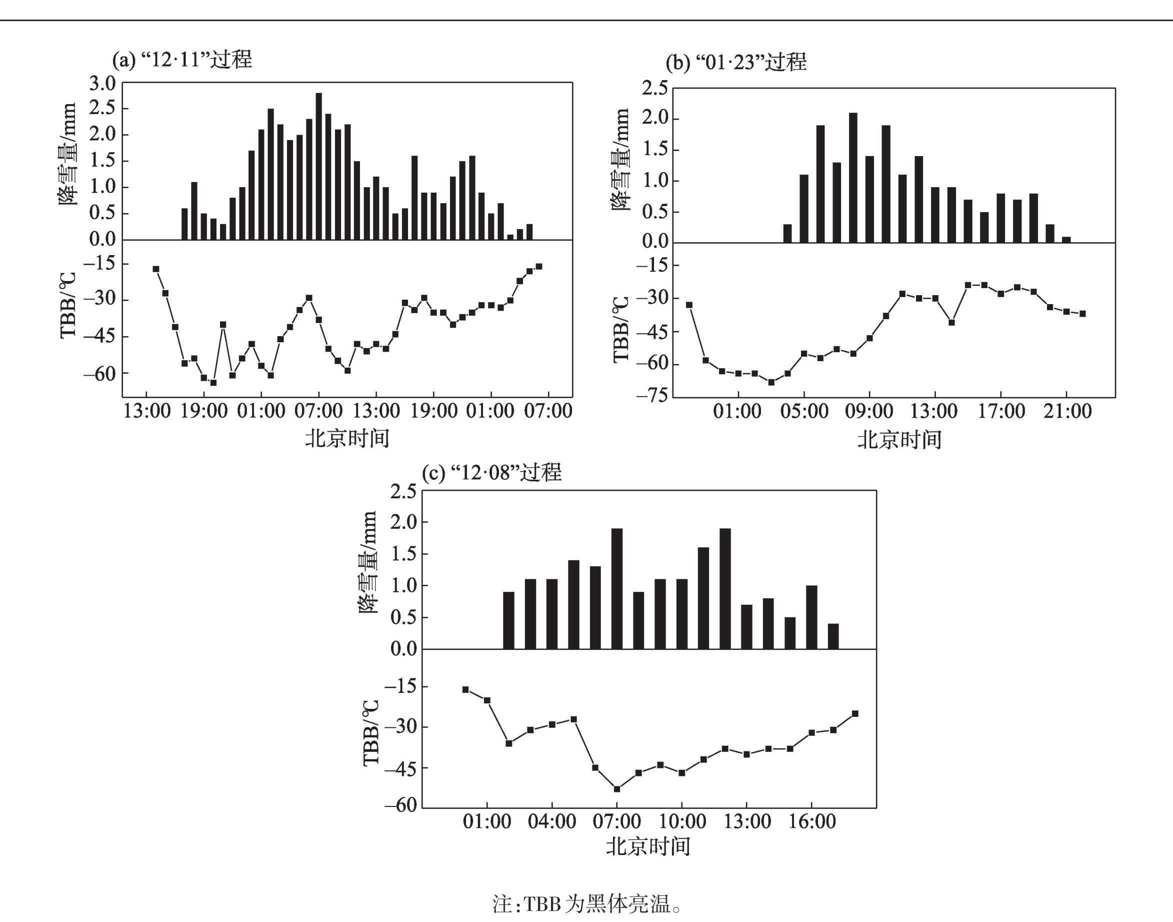
5　卫星云图

分析3场暴雪TBB的空间分布（图略），随西西伯利亚低槽东移南下，引导冷锋云系东南移，受天山山脉阻挡，冷锋云系进入新疆后移速减缓，在天山北坡长时间维持；中纬度短波槽前不断有相对独立的中尺度云团生成，随槽前西南气流向东北方向移动，在冷锋云系中不断发展加强（TBB<−50 ℃的低值带或低值区），在高空引导气流下，中尺度云团向东北方向移动经过乌鲁木齐上空，产生暴雪。

TBB有助于了解云系的发展演变趋势，与云顶高度呈负相关[22]，TBB越低，云顶高度越高，中尺度云团发展越旺盛，降雪越强，故TBB的降幅和低值维持时间与降雪强度及持续有很大联系。分析3场暴雪乌鲁木齐小时降雪与TBB变化曲线，“12·11”过程10日14:00 TBB从−24 ℃快速降低，17:00降至最低−65 ℃，降雪开始，降幅41 ℃，降雪过程中整体呈现缓慢上升趋势；但11日02:00和10:00存在低值，分别为−61 ℃和−60 ℃，对应小时雪强分别为2.5 mm和2.2 mm，TBB<−30 ℃维持近36 h（图8a）。“01·23”过程22日22:00 TBB从−33 ℃快速下降，23日03:00降至最低−68 ℃，降雪开始，降幅35 ℃，降雪过程中整体呈现缓慢上升趋势；但06:00和08:00降至−56 ℃和−55 ℃，对应小时雪强分别为1.9 mm和2.1 mm，TBB<−30 ℃维持近20 h（图8b）。“12·08”过程8日00:00 TBB自−18 ℃快速下降，02:00降至−38 ℃，降幅20 ℃，降雪开始；02:00—05:00缓慢升高，而后又快速下降，07:00降至最低−55 ℃，降幅27 ℃，对应小时雪强1.9 mm，TBB<−30 ℃维持近16 h（图8c）。综上，降雪前TBB的第一次迅速降低对应降雪开始，降雪过程中，能量不断释放，TBB整体呈现缓慢上升趋势，但降低时降雪强度大多有所增强，且低TBB滞留暴雪区上空时间越长，降雪时间越长，累计降雪量越大；TBB值的降幅、TBB<−30 ℃的维持时间均为“12·11”过程>“01·23”过程>“12·08”过程，与降雪强度对应一致，故TBB的降幅与低值维持时间对降雪短时临近预报有很好的指示意义。

6　结 论

本文对1990年以来乌鲁木齐最强的3场暴雪天气过程进行综合对比分析，揭示了典型暴雪发生发展时大尺度环流背景、高低空配置等方面的共性，以及不稳定条件、动力、水汽和中尺度演变特征



注：TBB为黑体亮温。

图8 乌鲁木齐小时降雪与TBB变化

Fig. 8 Hourly snowfall and black body temperature (TBB) changes in Urumqi

等方面存在的强度差异，得出以下结论：

（1）欧洲脊发展，西西伯利亚低槽南伸，南北低值系统叠加是造成乌鲁木齐典型暴雪的大尺度环流背景。高低空天气系统为明显的后倾槽结构，暴雪出现在925~600 hPa西北急流与600~200 hPa强西南急流叠置区，冷高压以西方路径东移，冷锋受天山山脉阻挡维持时间长，加之天山的地形强迫抬升，大尺度垂直运动发生发展，配合有利的热力和水汽条件，造成乌鲁木齐典型暴雪天气。

（2）暴雪前850~700 hPa附近均有东南风存在，微差平流使得降雪前平流逆温生成和维持，中高层"干暖盖"有利于能量不断积聚，后期冷平流进入，冷锋锋生，层结不稳定发展，为暴雪天气提供热力条件。且前期东南风的维持时间越长，强度越强，平流逆温维持时间越长，储存能量越多，降雪越强。在有利的水汽、动力条件下，降雪前低层东南风和平流逆温的强度及维持时间对降雪强度的预报有一定的指示意义。

（3）水汽自红海、地中海至波斯湾一带和阿拉伯海以西南和偏西2条水汽输送通道向暴雪区输送，中层水汽输送对乌鲁木齐暴雪至关重要，850~600 hPa存在较强的水汽辐合，700 hPa最强。水汽输送、辐合强度及持续时间共同决定暴雪强度。

（4）卫星云图是监测暴雪天气中尺度系统的有利工具，TBB与云顶高度呈负相关，TBB越低，云顶高度越高，中尺度云团发展越旺盛，降雪越强。降雪前TBB（云顶高度）的第一次迅速降低（升高）预示降雪开始，降雪过程中TBB降低时降雪强度大多有所增强，其降幅越大，降雪越强，低TBB值维持时间越长，累计降雪量越大，故TBB的降幅与低值维持时间对降雪短时临近预报有很好的指示意义。

参考文献（References）

[1] 王勇，赵战成，晏军，等. 新疆雪灾的时空分布特征及其等级划分[J]. 干旱区地理，2020, 43(3): 577−583. [Wang Yong, Zhao Zhancheng, Yan Jun, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and its classification of snow disaster in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(3): 577−583.]

[2] 阎琦, 温敏, 陆井龙, 等. 两次引发辽宁暴雪过程低涡的动力发展机制[J]. 气象, 2016, 42(4): 406−414. [Yan Qi, Wen Min, Lu Jinglong, et al. Dynamic diagnosis on formation and developing mechanism of two vortices causing snowstorms in Liaoning[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(4): 406−414.]

[3] 孙欣, 蔡芗宁, 陈传雷, 等. "070304"东北特大暴雪的分析[J]. 气象, 2011, 37(7): 863−870. [Sun Xin, Cai Xiangning, Chen Chuanlei, et al. Analysis of the 4 March 2007 heavy snowstorm in northeast China[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(7): 863−870.]

[4] 刘宁微, 齐琳琳, 韩江文. 北上低涡引发辽宁历史罕见暴雪天气过程的分析[J]. 大气科学, 2009, 33(2): 275−284. [Liu Ningwei, Qi Linlin, Han Jiangwen. The analyses of an unusual snowstorm caused by the northbound vortex over Liaoning Province in China [J]. Atmospheric Science, 2009, 33(2): 275−284.]

[5] 陈雪珍, 慕建利, 赵桂香, 等. 华北暴雪过程中的急流特征分析[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 1069−1075. [Chen Xuezhen, Mu Jianli, Zhao Guixiang, et al. Analysis of jet stream characteristic during the snowstorm process in north China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(4): 1069−1075.]

[6] 杨晓亮, 王咏青, 杨敏, 等. 一次暴雨与特大暴雪并存的华北强降水过程分析[J]. 气象, 2014, 40(12): 1446−1454. [Yang Xiaoliang, Wang Yongqing, Yang Min, et al. Analysis on severe heavy precipitation event with rainstorm and large blizzard in north China [J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(12): 1446−1454.]

[7] 周晋红, 马鸿青, 孙少雄, 等. 山西一次低空偏东风暴雪天气结构特征分析[J]. 高原气象, 2014, 33(5): 1305−1314. [Zhou Jinhong, Ma Hongqing, Sun Shaoxiong, et al. Structure analysis of a snowstorm with low-level eastern wind in Shanxi Province[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(5): 1305−1314.]

[8] 陈小婷, 潘留杰, 井宇, 等. 陕西东南部一次伴有雷暴的暴雪天气分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 1−9. [Chen Xiaoting, Pan Liujie, Jing Yu, et al. Analysis on a snowstorm weather process with thunderstorm in southeast Shaanxi[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(4): 1−9.]

[9] 冀兰芝, 全志伟, 宋琳琳, 等. 甘肃东部一次暴雪过程的诊断分析和数值模拟[J]. 干旱气象, 2014, 32(5): 845−850. [Ji Lanzhi, Quan Zhiwei, Song Linlin, et al. Numerical simulation and analysis of a snowstorm event in east Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(5): 845−850.]

[10] 杨涛, 杨莲梅, 周鸿奎, 等. 新疆北部小时降雪特征及大暴雪天气影响系统研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 725−733. [Yang Tao, Yang Lianmei, Zhou Hongkui, et al. Hourly snowfall characteristics and influence system of heavy snowstorm in northern Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 725−733.]

[11] 杨霞, 李阿桥, 赵逸舟, 等. 1961—2018年新疆北部冬季暴雪时空分布及其环流特征[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 756−765. [Yang Xia, Li Aqiao, Zhao Yizhou, et al. Spatial-temporal distribution and general circulation of snowstorm in northern Xinjiang from 1961 to 2018[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3): 756−765.]

[12] 刘晶, 李娜, 陈春艳. 新疆北部一次暖区暴雪过程锋面结构及中尺度云团分析[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 158−166. [Liu Jing, Li Na, Chen Chunyan. The frontal structure and analysis on mesoscale cloud characteristic during a warm zone blizzard process in north Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(1): 158−166.]

[13] 杨莲梅, 刘雯. 新疆北部持续性暴雪过程成因分析[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 507−519. [Yang Lianmei, Liu Wen. Cause analysis of persistent heavy snow processes in the northern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(2): 507−519.]

[14] 庄晓翠, 覃家秀, 李博渊. 2014年新疆西部一次暴雪天气的中尺度特征[J]. 干旱气象, 2016, 34(2): 326−334. [Zhuang Xiaocui, Qin Jiaxiu, Li Boyuan. Mesoscale characteristic of a snowstorm in western Xinjiang in 2014[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34 (2): 326−334.]

[15] 张俊兰, 施俊杰, 李伟, 等. 乌鲁木齐暴雪天气的环流配置及中尺度系统特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(1): 1−8. [Zhang Junlan, Shi Junjie, Li Wei, et al. Atmospheric circulation and meso-scale system characteristics of snowstorm in Urumqi[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(1): 1−8.]

[16] 庄晓翠, 李健丽, 李博渊, 等. 天山北坡2次暴雪过程机理分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 29−38. [Zhuang Xiaocui, Li Jianli, Li Boyuan, et al. The mechanism analysis of two times blizzard in central of north slope of Tianshan Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(1): 29−38.]

[17] 许婷婷, 张云惠, 于碧馨, 等. 2015年12月乌鲁木齐极端暴雪成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 23−29. [Xu Tingting, Zhang Yunhui, Yu Bixin, et al. Analysis of extreme blizzard in December 2015 in Urumqi[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(5): 23−29.]

[18] 于碧馨, 洪月, 张云惠, 等. 天山两麓一次极端暴雪天气多尺度配置及机制分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(5): 11−18. [Yu Bixin, Hong Yue, Zhang Yunhui, et al. Multiscale configuration characteristics and mechanism of an extreme snowstorm over the astride of Tianshan Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(5): 11−18.]

[19] 李娜, 李如琦, 秦贺, 等. 2018年10月乌鲁木齐暴雪过程锋面分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(5): 36−43. [Li Na, Li Ruqi, Qin He, et al. Frontal characteristics of snowstorm process in Urumqi in October 2018[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(5): 36−43.]

[20] 张俊兰, 崔彩霞, 陈春艳. 2013年北疆典型暴雪天气的水汽特征研究[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1115−1125. [Zhang Junlan, Cui Caixia, Chen Chunyan. Study on water vapor characteristic of heavy snowstorm cause in northern Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(4): 1115−1125.]

[21] 李如琦, 唐冶, 肉孜·阿基. 2010年新疆北部暴雪异常的环流和水汽特征分析[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 155−162. [Li Ruqi, Tang Ye, Aji Rouzi. Atmospheric circulation and water vapor char-

acteristics of snowstorm anomalies in northern Xinjiang in 2010 [J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(1): 155−162.]

[22] 王智敏, 冯婉悦, 李圆圆, 等. FY−2E卫星反演云特性参数产品在乌鲁木齐暴雪天气分析中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(3): 53−60. [Wang Zhimin, Feng Wanyue, Li Yuanyuan, et al. Microphysical characteristic parameters product retrieved by FY−2E satellite and its application in the Urumqi snowstorm weather analysis[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(3): 53−60.]

Mechanisms and causes of typical snowstorms in Urumqi

WEI Juanjuan[1,2], LI Na[1], WAN Yu[1], Mangsuer AIRETI[1], SHI Junjie[1]

(1. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 2. Urumqi Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Using conventional ground and upper-air observations, NCEP 1°×1° reanalysis data, and FY satellite data, this study focuses on three common types of snowstorm weather systems in Urumqi, Xinjiang, China from 1990 to the present, and considers snowstorms with high and low altitude circulation and weather system configuration, unstable conditions, water vapor, dynamic mechanisms, and black body temperature (TBB). The results show: (1) Three snowstorms occurred during the southeast recession of the European high-pressure ridge, which pushed the West Siberian trough eastward and southward and, combined with the mid-latitude short-wave trough, the weather system at high and low altitude showed a “backward trough” structure. Urumqi was in the area where the northwest jet, at 925−600 hPa, and the strong southwest jet, at 600−200 hPa, overlapped. Forced elevation uplift caused by the Tianshan Mountains contributed to maintaining and strengthening the snowstorm. (2) There are southeasterly winds from 850 hPa to 700 hPa before the snowstorm. The slight advection was beneficial to the generation and strengthening of advective inversion, and this led to a continuous accumulation of energy. In the later stage, cold air entered, a cold front was generated, and stratification developed unstably, resulting in heat conditions for the snowstorm. The longer southeasterly wind and advective inversions are maintained, the more energy is stored and, as a result, the stronger the snowfall. (3) There are two water vapor transport channels in the snowstorm area: the southwest and the west paths. Water vapor transport in the middle layer is very important for snowstorms in Urumqi. There is a strong water vapor convergence at 850−600 hPa, with 700 hPa being the strongest. Together, water vapor transport, convergence intensity and duration determine the intensity of the snowstorm. (4) There is a correlation between TBB and snowfall intensity. The lower the TBB, the higher the cloud top height, and the more vigorous the development of mesoscale cloud clusters, the stronger the snowfall. The first rapid decrease (increase) of TBB (cloud top height) before a snowfall begins indicates the start of the snowfall. The decrease of TBB during the snowfall corresponds to the increase in snowfall intensity, and the greater the TBB drop, the longer the maintenance time of the low TBB value and, as a result, the stronger the snowfall.

Key words: typical snowstorm; weather system configuration; weather mechanism; cause analysis; Urumqi